Russian Technological Journal.
2023;11(5):34–44

ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы

Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 658.5.012.14 + 621.37
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование профилограммной структуры микрополосковых СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати

Д.С. Воруничев [@], **М.С. Костин**

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[@] *Автор для переписки, e-mail: vorunichev@mirea.ru*

Резюме

Цели. Целью работы является исследование шероховатости поверхности токонесущей топологии и диэлектрика верхней (Top Layer) и нижней (Bottom Layer) сторон СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати при прототипировании опытных образцов СВЧ-модулей на 3D-принтере многослойных печатных плат DragonFly 2020 LDM.

Методы. Использованы методы металлографического анализа в светлом и темном поле, профилографирование шероховатости поверхностей, компьютерное моделирование.

Результаты. Получены экспериментальные образцы микрополосковых СВЧ-элементов модулей многослойных плат заданной конфигурации, датчиков телеметрии, PCB-антенн (антенн на печатных платах). Исследованы топологические и радиофизические особенности аддитивно сформированных верхнего и нижнего поверхностных слоев экспериментальных образцов плат полосковых модулей. Проведены оптические профилограммные измерения шероховатости наружных сторон платы по 10 точкам, которые составили для верхнего слоя топологии – 2 мкм, для нижнего – 0.3 мкм, а также определен средний размер зерна диэлектрической основы – 0.007 мм^2. Показано, что шероховатость токопроводящей топологии и диэлектрика верхней стороны соответствует 6–7 классам точности. При этом шероховатость микрополосковой токопроводящей топологии и диэлектрика нижней стороны платы соответствует 10–12 классам точности.

Выводы. Установлено, что неравномерное формирование нижнего и верхнего полосковых слоев печатного модуля способно оказывать влияние на неоднородность распределения радиофизических параметров (диэлектрическую проницаемость, поверхностную проводимость и т.д.), а также на нестабильность конструктивных характеристик (адгезионной способности, теплопроводности и т.д.) полоскового модуля, что необходимо учитывать при прототипировании устройств по технологии струйной 3D-печати, в т.ч. при адаптации Gerber-проектов PCB-модулей, созданных под технологию классического производства плат.

Ключевые слова: 3D-печать, СВЧ-модуль, прототипирование, аддитивная технология, наночернила, микрополосковые датчики, СВЧ-элементы, многослойные печатные платы, радиофизические параметры, структурная неоднородность

© Д.С. Воруничев, М.С. Костин, 2023

• **Поступила:** 08.02.2023 • **Доработана:** 20.04.2023 • **Принята к опубликованию:** 10.07.2023

Для цитирования: Воруничев Д.С., Костин М.С. Исследование профилограммной структуры микрополосковых СВЧ-модулей, изготовленных по аддитивной технологии трехмерной печати. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):34–44. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Investigation of the profilogram structure of microstrip microwave modules manufactured using additive 3D-printing technology

Dmitry S. Vorunichev [@], **Mikhail S. Kostin**

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] *Corresponding author, e-mail: vorunichev@mirea.ru*

Abstract

Objectives. The aim of the work is to study the surface roughness of the current-carrying topology and dielectric of the upper (Top Layer) and lower (Bottom Layer) sides of microwave modules manufactured using additive three-dimensional printing technology when prototyping prototypes of microwave modules on a 3D printer of DragonFly 2020 LDM multilayer printed circuit boards.

Methods. Methods of metallographic analysis in bright and dark fields, surface roughness profiling, and computer modeling were used.

Results. Experimental samples of microstrip microwave elements of modules of multilayer boards of a given configuration, telemetry sensors, printed circuit board (PCB) antennas were obtained. The topological and radiophysical features of the additively formed upper and lower surface layers of experimental samples of boards of strip modules were studied. Optical profilogram measurements of the roughness of the outer sides of the board were carried out at 10 points, amounting to 2 μm for the upper layer of the topology and 0.3 μm for the lower layer; the average grain size of the dielectric base was determined at 0.007 mm^2. The roughness of the conductive topology and upper side dielectric was shown to correspond to an accuracy class of 6–7, while the roughness of the microstrip conductive topology and the dielectric of the lower side of the board corresponds to an accuracy class of 10–12.

Conclusions. It is established that an uneven formation of the lower and upper strip layers of the printed module can affect the inhomogeneity of the distribution of radiophysical parameters (dielectric permittivity, surface conductivity, etc.), as well as the instability of the structural (adhesion ability, thermal conductivity, etc.) characteristics of the strip module, which must be taken into account when prototyping devices using inkjet 3D printing technology, including when adapting Gerber projects of PCB modules created for classical board production technology.

Keywords: 3D printing, microwave module, prototyping, additive technology, nanoink, microstrip sensors, microwave elements, multilayer printed circuit boards, radiophysical parameters, structural heterogeneity

• **Submitted:** 08.02.2023 • **Revised:** 20.04.2023 • **Accepted:** 10.07.2023

For citation: Vorunichev D.S., Kostin M.S. Investigation of the profilogram structure of microstrip microwave modules manufactured using additive 3D-printing technology. *Russ. Technol. J.* 2023;11(5):34–44. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-5-34-44

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии 3D-печати однородными материалами находят конструктивное применение в различных отраслях науки и техники, связанных с производством и прототипированием ряда промышленных изделий. Так, высокоточная печать полимерами или порошковыми металлами в прототипировании корпусов, деталей и сборочных единиц радиоэлектронных изделий применяется уже более 15 лет. Это позволяет сократить время на дополнительную проработку и стендовые испытания опытной разработки, запускаемой в серию. Технологии трехмерной печати в достаточной мере известны, исследованы и системно отработаны – сегодня на индустриальном рынке представлен широкий ряд технологического оборудования и композитов от различных компаний и производителей [1]. При этом в радиоэлектронном секторе промышленные технологии печатной электроники появились только в 2019 г. Это обусловлено тем, что для решения технологических задач аддитивной печати требуются специальные материалы, состоящие из раствора наночастиц в дисперсионной среде – наночернила [2]. Кроме того, важно отметить, что аддитивное решение двухкомпонентной печати требует комбинированного применения наночернил (проводящих и диэлектрических), обладающих совместимыми радиофизическими свойствами, обеспечивающими печать с необходимой разрешающей способностью и равномерностью распределения заданных параметров в многослойной структуре печатного модуля. Успешная разработка и создание подходящих по характеристикам наночернил с низкой температурой спекания открыло в радиоэлектронной отрасли новое направление аддитивной печатной электроники [2–6]. Сегодня печатная электроника решает задачи прототипирования, в т.ч. в области СВЧ-техники, и стремительно развивается, формируя новый контент быстрых производственно-технологических решений. Появилась возможность печатать прототипы устройств на многослойных печатных платах с заданной конфигурацией непосредственно в дизайн-центрах, не передавая разработку на изготовление третьей стороне – контрактному производству. Данный формат позволяет сократить сроки, требуемые на прототипирование и отладку новой разработки, поскольку изготовление многослойной печатной платы на контрактном производстве занимает до нескольких недель. Как правило, за это время появляется новая доработанная версия изделия, что требует повторения цикла. При этом циклы отладки изделия до выпуска финальной схемотехники и компоновки устройства могут повторяться несколько раз. В то же время печать производственных файлов прототипа непосредственно в дизайн-центре на 3D-принтере занимает всего несколько часов, после чего прототип может быть собран и проверен на работоспособность с последующим внесением всех необходимых изменений для повторения цикла. Текущие возможности печатной электроники постоянно расширяются благодаря постоянным исследованиям и инновациям в данной области. Технология печатной СВЧ-электроники дает существенно большую гибкость решений конструктору, например, позволяя выполнять на плате печатные элементы: конденсаторы, трансформаторы, антенны, RFID-метки[1] и т.д. на различных типах подложек, в т.ч. гибких с точностью до нескольких микрон [7, 8]. Еще одно преимущество аддитивной 3D-технологии – сохранение оригинальной разработки изделия и интеллектуальной собственности внутри компании до начала его серийного изготовления на производственно-технологическом уровне защиты разработки от реинжиниринга[2, 3] [9].

Целью данной работы является экспериментальное исследование штатных режимов аддитивной технологии трехмерной печати изделий и элементов микрополосковой (МПЛ) СВЧ-электроники, реализуемой на базе уникального для отечественной радиоэлектроники 3D-принтера DragonFly (производитель – Nano Dimension, Израиль), позволяющих

[1] RFID – Radio Frequency IDentification.

[2] Хесин С. 3D-принтер DragonFly – революция в изготовлении многослойных печатных плат. *Вектор высоких технологий*. 2018;4(39):38–41. [Khesin S. The DragonFly 3D printer is a revolution in the manufacture of multilayer printed circuit boards. *Vektor Vysokikh Tekhnologii = The Hi-Tech Vector Research and Practice Journal*. 2018;4(39):38–41 (in Russ.).]. https://ostec-group.ru/upload/iblock/3fd/hesin.pdf. Дата обращения 08.02.2023. / Available February 08, 2023.

[3] DragonFly LDM. Inks User Guide NanoDimension. Ness Ziona: Nano Dimension Technologies Ltd. 2020. 52 p. https://www.nano-di.com/ame-dragonfly-ldm-2-0. Дата обращения 08.02.2023. / Available February 08, 2023.

Таблица 1. Технологические возможности печати 3D-принтера DragonFly LDM 2020

Технологический параметр	Значение/характеристика параметра
Проводник/зазор	100 мкм
Минимальная толщина слоя	17 мкм
Диаметр капли диэлектрика	3 мкм
Диаметр капли токопроводящих чернил	0.4 мкм
Количество слоев	до 55
Минимальный диаметр металлизированных сквозных отверстий	400 мкм
Минимальный диаметр неметаллизированных сквозных отверстий	400 мкм
Минимальный диаметр переходных отверстий	<200 мкм
Максимальные размеры платы	160 × 160 × 3 мм
Время печати платы	от 3 до 20 ч
Максимальная температура пайки	165 °C
Проводящие чернила	AgCite 90072 Silver Nanoparticle Conductive Ink (производитель – Nano Dimension, Израиль)
Диэлектрические чернила	Dielectric Ink 1092 – Dielectric UV Curable Acrylates Ink (производитель – Nano Dimension, Израиль)

достигнуть наилучших результатов по однородности формирования проводящих и диэлектрических слоев, а также шероховатости поверхности топологии многослойных печатных плат СВЧ-модулей, влияющих на характер стабильности радиофизических параметров изделия.

1. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ НА 3D-ПРИНТЕРЕ DRAGONFLY

Исследование выполнено с применением 3D-принтера DragonFly LDM 2020, действующего в мегалабораторном кластере «Радиоэлектронные технологии» Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА. Это оборудование по своей сути является минифабом (минифабрикой) (рис. 1), представляющим собой автоматизированную систему полного цикла изготовления электронных устройств аддитивным методом двухкомпонентной струйной печати. Печать осуществляется двумя струйными чернильными головками (токопроводящей и диэлектрической) с последующим послойным отверждением: инфракрасным для токопроводящих чернил и УФ-системой для диэлектрических чернил. Количество опробованных в лабораторных условиях слоев печатной платы – до 55 (при этом фактическое технологическое ограничение – в пределах рабочей области печати внутри машинного отделения системы). Основные характеристики и технологические нормы печати радиоэлектроники на 3D-принтере DragonFly LDM 2020, а также применяемые проводящие и диэлектрические чернила, приведены в табл. 1.

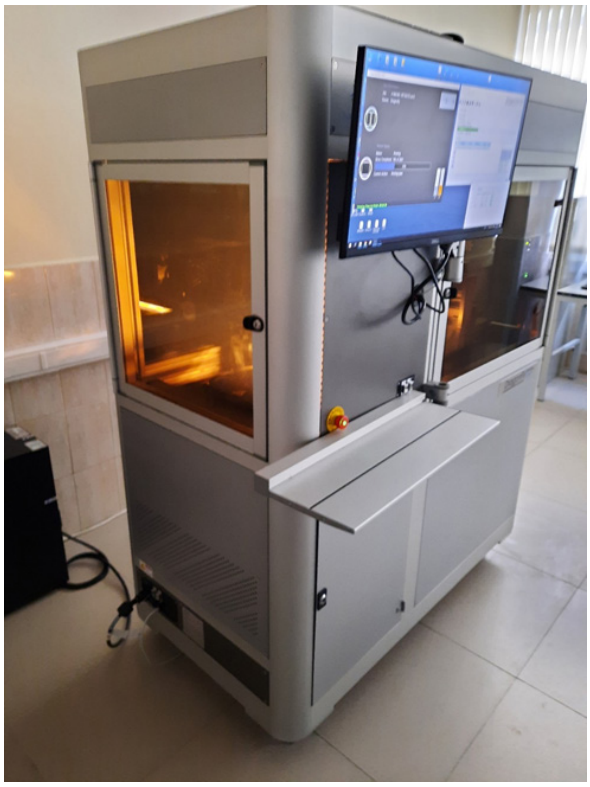


Рис. 1. 3D-принтер DragonFly LDM 2020, действующий в мегалабораторном кластере «Радиоэлектронные технологии» Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА

Опытные образцы распечатанных плат с топологией СВЧ-элементов для исследования структуры поверхностей наружных сторон (слоев), выполненных по технологии печатной радиоэлектроники, представлены на рис. 2 и на рис. 3.

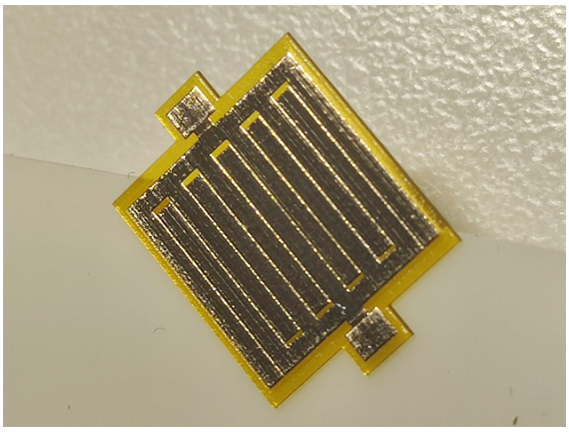


Рис. 2. Печатный СВЧ-датчик, изготовленный РТУ МИРЭА в интересах проектного исследования для АО «Технопарк Санкт-Петербурга»

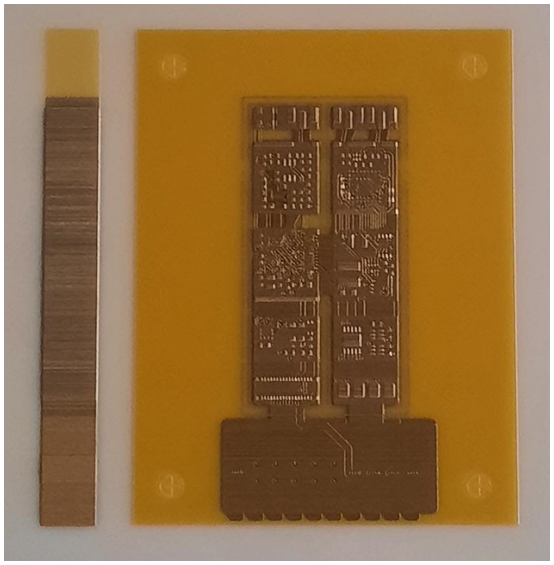


Рис. 3. Печатный СВЧ-модуль четырехслойной платы глобальной навигационной спутниковой системы, изготовленный РТУ МИРЭА в интересах НПК «Технологический центр» (общая толщина печатного модуля – 0.123 мм)

В процессе технологического цикла аддитивной 3D-печати многослойной платы МПЛ СВЧ-модуля установлено, что верхний его слой (сторона Top Layer) и нижний (сторона Bottom Layer) формируются при различных условиях среды (контактного/неконтактного положения формирования топологии образца). Из-за этого стороны имеют отличающуюся на порядок шероховатость поверхностей, в отличие от традиционной технологии изготовления многослойных печатных плат с одинаковыми по структуре медными трассами и диэлектриком на обоих наружных слоях. Данное обстоятельство может влиять на конструкционные характеристики платы (адгезию проводящего слоя с диэлектриком, газоадсорбцию, остаточную механическую напряженность, теплофизические свойства, смешиваемость припоя на адгезионном проводящем слое и т.д.) и неравномерность распределения ее радиофизических параметров (поверхностного сопротивления, диэлектрической проницаемости, импедансной неоднородности, сигнальной задержки и т.д.), что необходимо учитывать при прототипировании СВЧ-модулей, реализуемых по технологии аддитивной печатной электроники.

Шероховатость поверхности, определяющую однородность структуры проводящего слоя, принято оценивать по неровностям профиля (рис. 4), который получают путем сечения реальной поверхности плоскостью [5].

Из оцениваемых параметров профилограммной характеристики шероховатости платы определяются следующие:

1. Среднее отклонение профиля R_{av}

$$R_{av} = \frac{1}{l}\int_0^l |\, y(x)\,|\, dx, \qquad (1)$$

где l – базовая длина, y – отклонение профиля, x – горизонтальная координата.

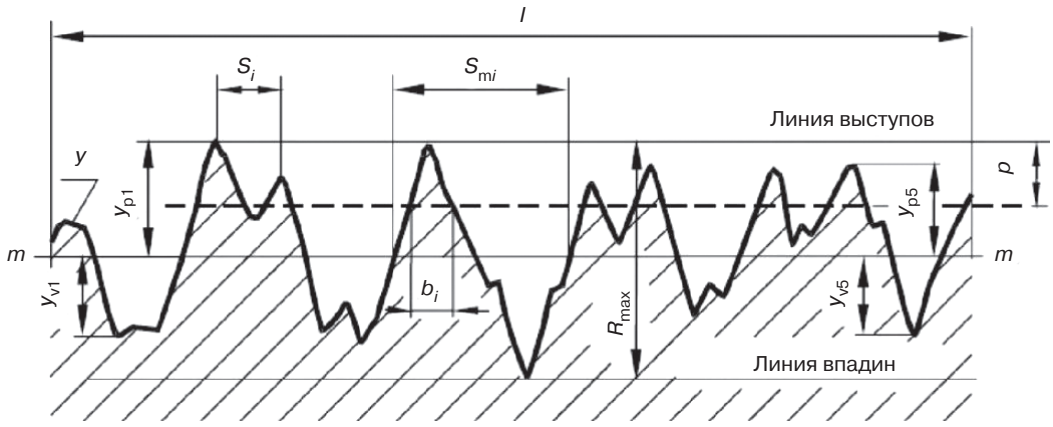


Рис. 4. Профилограммные характеристики шероховатости платы

При дискретном способе обработки профилограммы параметр R_{av} рассчитывают по формуле:

$$R_{av} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} | y_i |, \quad (2)$$

где y_i – измеренные отклонения профиля в дискретных точках, n – число измеренных дискретных отклонений на базовой длине.

2. Высота неровностей профиля по десяти точкам R_z.

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^{5} | y_{pi} | + \sum_{i=1}^{5} | y_{vi} |}{5}, \quad (3)$$

где y_{pi} – высота i-го наибольшего выступа профиля, y_{vi} – глубина i-й наибольшей впадины профиля.

3. Наибольшая высота неровностей профиля R_{max}.
4. Средний шаг неровностей профиля S_m.
5. Средний шаг местных выступов S.
6. Относительная опорная длина профиля t_p (где p – значения уровня сечения профиля), определяемая по формуле:

$$t_p = \frac{1}{l}\left(\sum_{i=1}^{n} b_i\right)\cdot 100\%, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^{n} b_i$ – опорная длина профиля, b_i – составляющие опорной длины.

В совокупности расчетные формулы (1)–(4) позволяют далее оценить профилограммные характеристики МПЛ структуры СВЧ-модуля.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛОГОРАММНОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАРУЖНЫХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ СВЧ-МОДУЛЕЙ

Верхняя сторона (Top Layer) многослойной печатной платы СВЧ-модуля формируется аддитивным методом печати на предыдущий слой. Наружный слой печатается наночернилами и отверждается, контактируя с воздушной средой. При таком технологическом режиме верхний слой имеет значительно более высокую шероховатость поверхности и зернистость, чем нижний. На рис. 5 показана двумерная микровизионная профилограмма верхнего слоя опытного образца напечатанной платы СВЧ-модуля (рис. 3) с измерением величины зерна диэлектрического слоя.

Исследования структуры поверхности и измерения проводились по методу работы в темном поле на микровизоре μVizo-MET-221 (производитель – ЛОМО, Россия). Как видно из микровизионного снимка фрагмента, площадь зерна диэлектрической части составляет в среднем 0.007 мм^2 и более, что достаточно много и обусловлено печатью слоя наночастицами с дальнейшим их спеканием системой отверждения. По полученной оптическим методом с микровизора

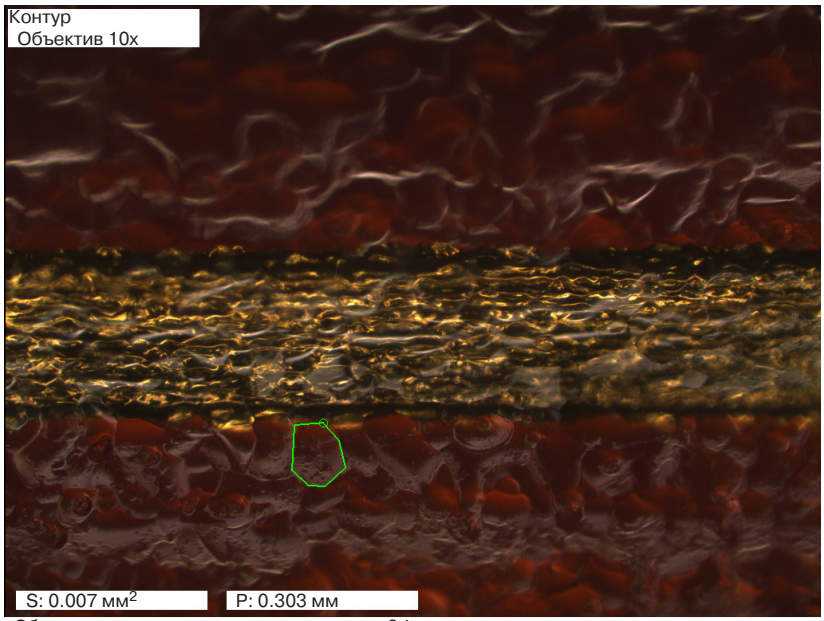


Рис. 5. Фрагмент печатной платы опытного образца СВЧ-модуля с наложенным измерением величины зерна диэлектрика (в центре – проводник, напечатанный проводящими чернилами, остальное – диэлектрическая часть, напечатанная диэлектрическими чернилами)

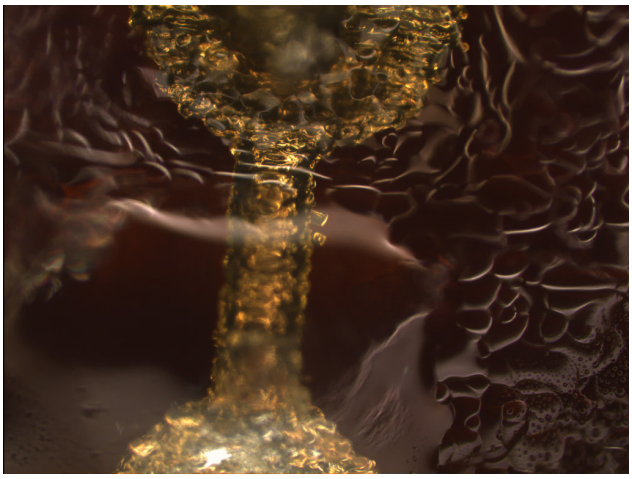


Рис. 6. Профилограмма верхней стороны распечатанной платы образца СВЧ-модуля

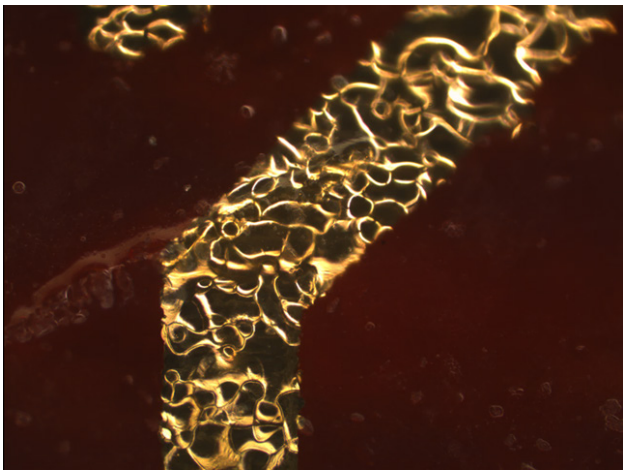


Рис. 7. Профилограмма нижней стороны распечатанной платы образца СВЧ-модуля

двумерной профилограмме путем изменения резкости между выступом и впадиной проведены измерения шероховатости поверхности, где фокальная разница между резкостью есть глубина измеряемой канавки. Измерения проводились по десяти точкам фрагмента верхней стороны многослойной печатной платы, представленного на профилограмме (рис. 6). Измеренная шероховатость верхней стороны – 2 мкм.

Нижняя сторона (Bottom Layer) формируется аддитивным методом на гладкой одноразовой майларовой подложке, помещенной на вакуумный столик. К нижней стороне при печати будут добавляться остальные слои, но непосредственно только нижняя сторона физически печатается на гладкой подложке, что снижает шероховатость на порядок по сравнению с верхним слоем. Проведены измерения в десяти точках шероховатости нижней стороны по аналогичной методике, профилограмма приведена на рис. 7. Измеренная шероховатость нижней стороны – 0.3 мкм.

С использованием программного профилографа (производитель – Mitutoyo, Япония) были построены профилограммы верхней и нижней сторон многослойной платы образца СВЧ-модуля для проводящих и диэлектрических конструктивных слоев. Результаты фрагментарных измерений профилограмм МПЛ проводящей топологии и диэлектрического основания экспериментальных образцов приведены в табл. 2.

Результаты измерений профилографом соответствуют оптическим измерениям микровизором и составили:

- слой Top Layer: шероховатость элемента МПЛ (проводящего слоя печатной топологии) R_{av} = 1.6–2.1 (6–7 класс), шероховатость диэлектрика R_{av} = 1.7–1.8 (6–7 классы);
- слой Bottom Layer: шероховатость элемента МПЛ (проводящего слоя печатной топологии) R_{av} = 0.04–0.12 (10–12 класс), шероховатость диэлектрика R_{av} = 0.03–0.08 (11–12 классы).

Важно отметить, что неравномерное профилограммное формирование нижнего и верхнего полосковых слоев СВЧ-модуля, выполненного по аддитивной технологии, определяет регулярность внутренней структуры материалов и способно оказывать влияние на неоднородность распределения радиофизических параметров (диэлектрическую проницаемость, поверхностную проводимость, импедансную характеристику МПЛ, сигнальную задержку и т.д.)[4] [9–14], а также на стабильность конструктивных характеристик полоскового модуля (адгезии проводящего слоя с диэлектриком, газоадсорбции, остаточной механической напряженности, теплофизических свойств, смешиваемости припоя на адгезионном проводящем слое и т.д.). Это необходимо учитывать при прототипировании устройств по аддитивной технологии 3D-печати, в т.ч. при адаптации Gerber-проектов[5] PCB-модулей, созданных под технологию классического производства плат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе 3D-принтера DragonFly LDM 2020 исследованы топологические и радиофизические особенности аддитивно сформированных верхнего и нижнего поверхностных слоев экспериментальных образцов плат полосковых модулей. Проведены оптические профилограммные измерения шероховатости наружных сторон платы в темном поле на металлографическом микровизоре μVizo-MET-221, а также профилографом с построением соответствующих характеристик.

[4] DragonFly LDM. Inks User Guide NanoDimension. Ness Ziona: Nano Dimension Technologies Ltd. 2020. 52 p. https://www.nano-di.com/ame-dragonfly-ldm-2-0. Дата обращения 08.02.2023. / Available February 08, 2023.

[5] Файлы Gerber-формата для производства PCB-модулей. [Gerber-format files for PCB modules production.]

Таблица 2. Профилограммные характеристики элементов печатной топологии (фрагментов) многослойной напечатанной платы опытного образца СВЧ-модуля

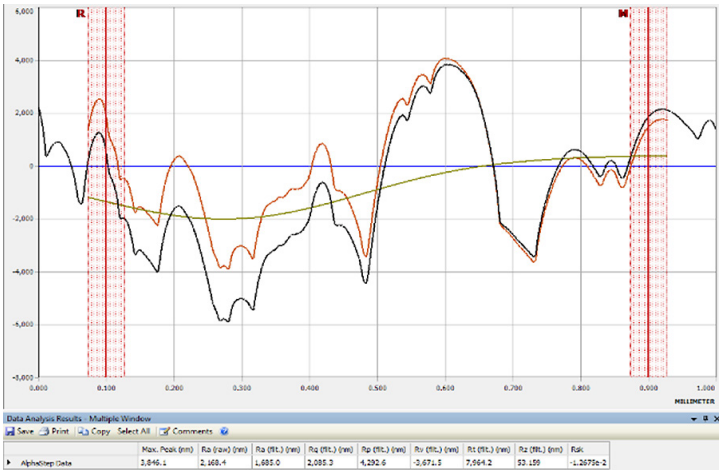
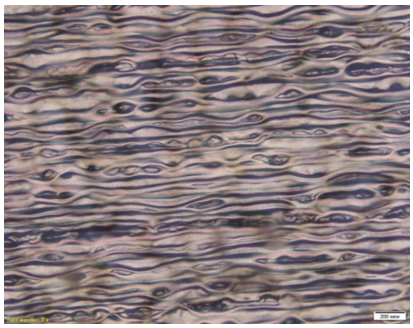
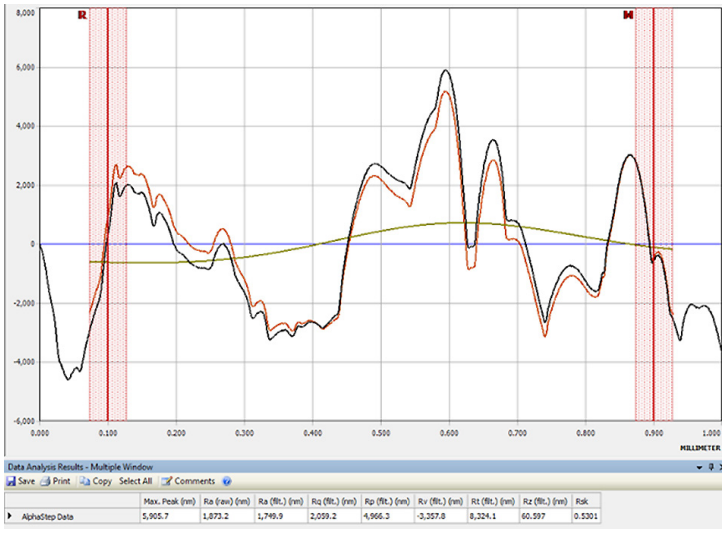
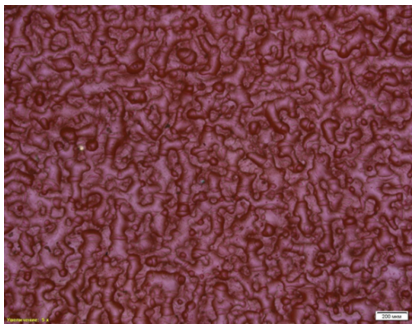
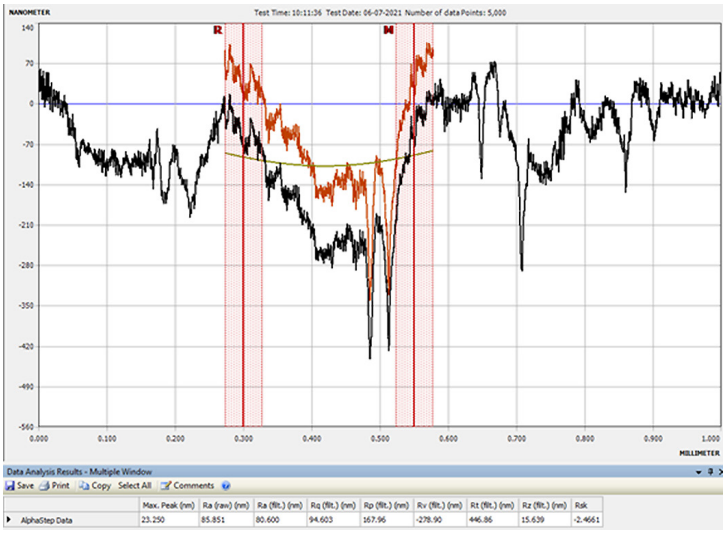
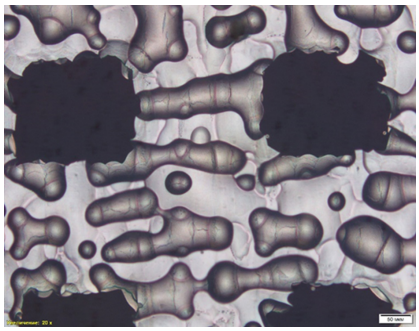
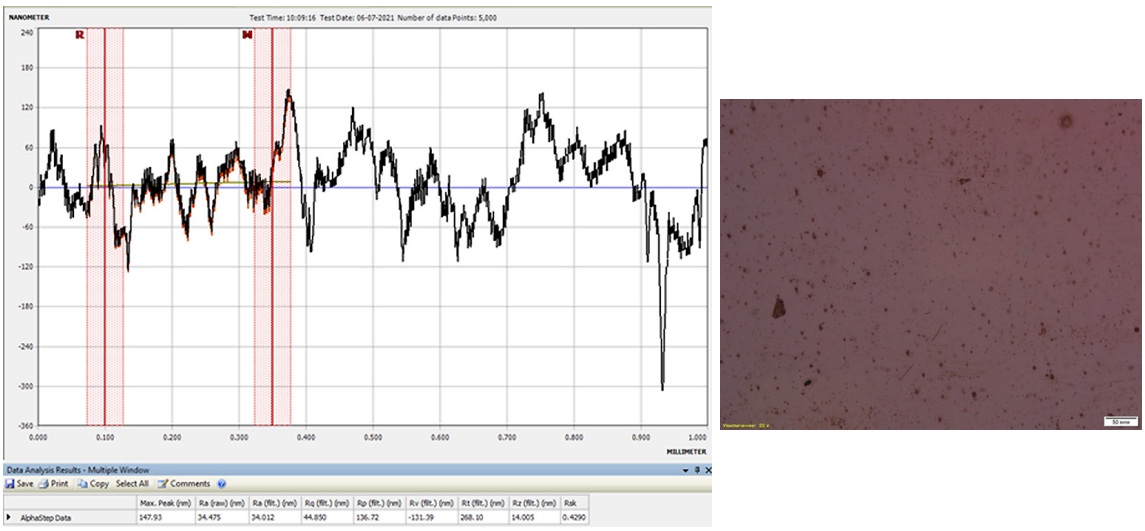
Верхняя сторона (Top Layer)		
Элемент МПЛ, кратное увеличение ×5		
Диэлектрик, кратное увеличение ×5		
Нижняя сторона (Bottom Layer)		
Элемент МПЛ, кратное увеличение ×20		

Таблица 2. Окончание

Нижняя сторона (Bottom Layer)	
Диэлектрик, кратное увеличение ×20	

Проведенное исследование опытных образцов показало существенную разницу шероховатости поверхностей: верхняя сторона – 2 мкм, нижняя сторона – 0.3 мкм при микровизионных измерениях и верхняя сторона – 1.8 мкм, нижняя сторона – 0.1 мкм при измерениях профилографом. Данный параметр может оказывать влияние на конструкционные, технологические и электрические характеристики изделия. Определен средний размер зерна диэлектрической части – 0.007 мм^2, а также причины разницы в шероховатости сторон.

Результаты проведенного исследования шероховатости сторон и профилограмм многослойной печатной платы могут быть использованы при проектировании МПЛ изделий, изготавливаемых методом печатной электроники, а также для разработки решений по совершенствованию технологии в целях сопоставления характеристик векторного анализа структурной неоднородности топологии опытных образцов СВЧ-модулей.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати. *Russ. Technol. J.* 2019;7(1):80–101. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101
2. Sokol D., Yamada M., Nulman J. Design and Performance of Additively Manufactured In-Circuit Board Planar Capacitors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021;68(11):5747–5752. https://doi.org/10.1109/TED.2021.3117934
3. Li M., Yang Y., Nulman J., Yamada M., Iacopi F. Unique multi-level metal layer electronics solutions offered by advanced 3D printing. In: *2022 6th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)*. 2022. P. 144–144. https://doi.org/10.1109/EDTM53872.2022.9798133
4. de Marzo G., Mastronardi V.M., Algieri L., et al. Sustainable, Flexible, and Biocompatible Enhanced Piezoelectric Chitosan Thin Film for Compliant Piezosensors for Human Health. *Advanced Electronic Materials*. 2022. https://doi.org/10.1002/aelm.202200069

REFERENCES

1. Kharalgin S.V., Kulikov G.V., Kotelnikov A.B., Snastin M.V., Dobychina E.M. Prototyping of microwave devices with specified electrodynamic characteristics using additive 3D printing technology. *Russ. Technol. J.* 2019;7(1):80–101 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101
2. Sokol D., Yamada M., Nulman J. Design and Performance of Additively Manufactured In-Circuit Board Planar Capacitors. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2021;68(11):5747–5752. https://doi.org/10.1109/TED.2021.3117934
3. Li M., Yang Y., Nulman J., Yamada M., Iacopi F. Unique multi-level metal layer electronics solutions offered by advanced 3D printing. In: *2022 6th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)*. 2022. P. 144–144. https://doi.org/10.1109/EDTM53872.2022.9798133
4. de Marzo G., Mastronardi V.M., Algieri L., et al. Sustainable, Flexible, and Biocompatible Enhanced Piezoelectric Chitosan Thin Film for Compliant Piezosensors for Human Health. *Advanced Electronic Materials*. 2022. https://doi.org/10.1002/aelm.202200069

5. Wu S.-Y., Yang C., Hsu W., Lin L. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors. *Microsyst. Nanoeng*. 2015;1(1):15013. https://doi.org/10.1038/micronano.2015.13
6. Li M., Yang Y., Iacopi F., Yamada M., Nulman J., et al. Compact multilayer bandpass filter using low-temperature additively manufacturing solution. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2021;68(7):3163–3169. https://doi.org/10.1109/TED.2021.3072926
7. Li Y., Ge L., Wang J., et al. A *Ka*-band 3-D-printed wideband stepped waveguide fed magnetoelectric dipole antenna array. *IEEE Trans. Antennas Propag*. 2020;68(4):2724–2735. https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2950868
8. Корнилов Д.Ю., Ткачев С.В., Зайцев Е.В., Ким В.П., Кушнир А.Е. Принтерные технологии в электронике. Материалы и устройства для печати – первый российский семинар (Москва, 15.12.2017). *РЭНСИТ*. 2017;9(2):181–204.
9. Воруничев Д.С., Воруничева К.Ю. Текущие возможности технологии прототипирования многослойных печатных плат на 3D-принтере. *Russ. Technol. J*. 2021;9(4):28–37. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-28-37
10. Huang G.-L., Han C.-Z., Xu W., Yuan T., Zhang X. A compact 16-way high-power combiner implemented via 3-D metal printing technique for advanced radio-frequency electronics system applications. *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2019;66(6):4767–4776. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2863219
11. Vorunichev D.S. Application of Additive Technology for 3D Printing of Electronic Devices as a Way to Reduce Prototyping Time. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies* (*IT&QM&IS*). 2021. P. 480–483. https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642806
12. Vorunichev D.S. Prototyping Electronic Devices on a Dragonfly 3D Printer as a Means of Preserving Original Developments inside the Design Center. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies* (*IT&QM&IS*). 2021. P. 472–475. https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642911
13. Костин М.С., Ярлыков А.Д. Радиоволновая технология резонансной газосенсорной СВЧ-телеметрии. *Russ. Technol. J*. 2021;9(1):18–28. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28
14. Li M., Yang Y., Iacopi F., Nulman J., Chappel-Ram S. 3D-printed low-profile single-substrate multi-metal layer antennas and array with bandwidth enhancement. *IEEE Access*. 2020;8:217370–217379. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041232

5. Wu S.-Y., Yang C., Hsu W., Lin L. 3D-printed microelectronics for integrated circuitry and passive wireless sensors. *Microsyst. Nanoeng*. 2015;1(1):15013. https://doi.org/10.1038/micronano.2015.13
6. Li M., Yang Y., Iacopi F., Yamada M., Nulman J., et al. Compact multilayer bandpass filter using low-temperature additively manufacturing solution. *IEEE Trans. Electron Devices*. 2021;68(7):3163–3169. https://doi.org/10.1109/TED.2021.3072926
7. Li Y., Ge L., Wang J., et al. A *Ka*-band 3-D-printed wideband stepped waveguide-fed magnetoelectric dipole antenna array. *IEEE Trans. Antennas Propag*. 2020;68(4):2724–2735. https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2950868
8. Kornilov D.Yu., Tkachev S.V., Zaitsev E.V., Kim V.P., Kushnir A.E. Printer technologies in electronics. Materials and Devices for Printing – the First Russian Seminar (Moscow, December 15, 2017). *RENSIT*. 2017;9(2):181–204. https://doi.org/10.17725/rensit.2017.09.181
9. Vorunichev D.S., Vorunicheva K.Yu. Current capabilities of prototyping technologies for multilayer printed circuit boards on a 3D printer. *Russ. Technol. J*. 2021;9(4):28–37 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-28-37
10. Huang G.-L., Han C.-Z., Xu W., Yuan T., Zhang X. A compact 16-way high-power combiner implemented via 3-D metal printing technique for advanced radio-frequency electronics system applications. *IEEE Trans. Ind. Electron*. 2019;66(6):4767–4776. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2863219
11. Vorunichev D.S. Application of Additive Technology for 3D Printing of Electronic Devices as a Way to Reduce Prototyping Time. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies* (*IT&QM&IS*). 2021. P. 480–483. https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642806
12. Vorunichev D.S. Prototyping Electronic Devices on a Dragonfly 3D Printer as a Means of Preserving Original Developments inside the Design Center. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies* (*IT&QM&IS*). 2021. P. 472–475. https://doi.org/10.1109/ITQMIS53292.2021.9642911
13. Kostin M.S., Yarlykov A.D. Radiowave technology of resonant gas-sensor microwave telemetry. *Russ. Technol. J*. 2021;9(1):18–28 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-1-18-28
14. Li M., Yang Y., Iacopi F., Nulman J., Chappel-Ram S. 3D-printed low-profile single-substrate multi-metal layer antennas and array with bandwidth enhancement. *IEEE Access*. 2020;8:217370–217379. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3041232

Об авторах

Воруничев Дмитрий Сергеевич, заместитель директора Института радиоэлектроники и информатики; преподаватель, кафедра конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vorunichev@mirea.ru. Scopus Author ID 57204939440, SPIN-код РИНЦ 5559-6656, http://orcid.org/0000-0003-0512-7572

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, http://orcid.org/0000-0002-5232-5478

About the authors

Dmitry S. Vorunichev, Deputy Director of the Institute of Radio Electronics and Informatics; Lecturer of the Department of Design and Production of Radioelectronic Means, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vorunichev@mirea.ru. Scopus Author ID 57204939440, RSCI SPIN-code 5559-6656, http://orcid.org/0000-0003-0512-7572

Mikhail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, http://orcid.org/0000-0002-5232-5478